MONITORAGGIO RISORSA NIVALE (SVE) IN VENETO con sensori CRNS

Di Mauro Valt ARPAV Avalanche Center Arabba , Llvinallongo del Col di Lana, Italy Mauro.valt@arpa.veneto.it

The snowpack is an important resource for hydrology, vegetation, winter sports and energy production. The 2021-22 and 2022-23 winter seasons were mild, with little rainfall and significant repercussions on the general availability of water resources. The decrease in snowfall is in fact evident throughout the Alps, with greater trends at low altitudes, especially in the last 30–40 years.

In the eastern Alps, the reduction in snow is especially evident in March with a decrease in the Snow Water Equivalent (SWE) of more than 60% in the period 1991-2020 compared to the previous thirty years (1961-1990), below 2000 meters. To monitor the SWE in the mountains, Arpa Veneto-Centro Valanghe di Arabba, built a network with 25 latest-generation CRNS (Cosmic Ray Neutron Sensor) sensors between 2023 and 2024.

To validate the data from these sensors, more than 200 SWE cores were taken in the vicinity of the sensors. The first results show a high correlation coefficient (0.90) between the cores and the instrumental measurements with sites above 0.95, while some are below 0.80. For the latter, elements of measurement disturbance were found, such as the presence of ski slopes, woods or buildings in the immediate vicinity. Il manto nevoso è una risorsa importante per l'idrologia, la vegetazione, gli sport invernali e per la produzione di energia. Le stagioni invernali 2021-22 e 2022-23 sono state miti, con scarse precipitazioni e importanti ripercussioni sulla disponibilità generale della risorsa idrica. La diminuzione della precipitazione nevosa è infatti evidente su tutto l'arco alpino, con trend maggiori alle basse quote, specie negli ultimi 30-40 anni.

Nelle Alpi orientali la riduzione della neve è evidente soprattutto nel mese di marzo, con un calo della risorsa idrica nivale (Snow Water Equivalent -SWE) di oltre il 60% al di sotto dei 2000 metri nel periodo 1991-2020 rispetto al trentennio precedente (1961-1990).

Per monitorare lo SWE in montagna, Arpa Veneto – Centro Valanghe di Arabba ha realizzato fra il 2023 e il 2024 una rete con 25 sensori CRNS (Cosmic Ray Neutron Sensor) di ultima generazione.

Per validare i dati di questi sensori sono stati effettuati più di 200 carotaggi di SWE in prossimità dei sensori.

I primi risultati evidenziano un elevato coefficiente di correlazione (0.90) fra i carotaggi e le misure strumentali, con siti superiori allo 0.95 e alcuni inferiore allo 0.80. Per questi ultimi sono stati riscontrati degli elementi di disturbo della misurazione, come la presenza nelle immediate vicinanze di piste da sci, boschi o edifici.



NEVE

INTRODUZIONE

Il manto nevoso è una risorsa importante per l'ambiente montano per diversi aspetti come ad esempio l'idrologia, la vegetazione, gli sport invernali e la produzione di energia. Le stagioni invernali 2021-22 e 2022-23 sono state miti, con scarse precipitazioni e importanti ripercussioni sulla disponibilità della risorsa idrica (Colombo et al., 2023). La diminuzione della precipitazione nevosa è evidente su tutto l'arco alpino, con trend maggiori alle basse quote specie negli ultimi 30-40 anni (Bertoldi et al. 2024). Nelle Alpi orientali la riduzione della neve negli ultimi 30 anni (1991-2020) è evidente soprattutto nel mese di marzo con un calo della risorsa nivale (Snow Water Equivalent - SWE) di oltre il 60% al di sotto dei 2000 metri (Valt, 2023) rispetto al trentennio precedente (1961-1990).

Il suo monitoraggio diventa quindi strategico per l'ottimizzazione dei consumi nel periodo primaverile/estivo (idropotabile, agricoltura, produzione di energia, industria, etc.)

Nel campo del telerilevamento, le stime spaziali dell'equivalente in acqua della neve sono ricavate, in modo operativo, utilizzando le informazioni sulla copertura nevosa (Snow Cover Area - SCA), elaborando le informazioni fornite dal sensore MODIS (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer) installato a bordo dei satelliti Terra e Aqua con associati modelli di spazializzazione dei dati di altezza neve (HS) e densità del manto nevoso (p) (Valt e Cianfarra, 2015), mentre sono in fase di testing tecnologie operative su media scala utilizzando dati SAR (Oveisgharan et al. 2024, https://techport.nasa.gov/ projects/90997).

Il monitoraggio in alcuni bacini montuosi, tipo il Piave (1300 km2), avviene mediante campagne di misure a terra con carotaggi verticali del manto nevoso (Berni e Giancanelli, 1967), estrapolando dati di SWE (Barlet e Lehning, 2002) dai profili neve dei Servizi valanghe (Valt et al., 2012) e attraverso la modellistica del manto nevoso (Morin et al. 2023).

Comunque, a livello di Arco alpino, lo SWE a terra è in generale scarsamente campionato e le serie storiche sono assai rare e discontinue.

Pertanto, per la gestione operativa della disponibilità della risorsa idrica derivante dalla fusione della neve, è necessario disporre di sensori di misura/stima dello SWE in tempo reale.

Nel presente lavoro viene descritta la rete di monitoraggio per la stima dello SWE realizzata da ARPA Veneto con sensori CRNS.

SENSORI PER LA MISURA IN TEMPO REALE DELLO SWE

La misura dello SWE con sensori automatici rappresenta una sfida da molto tempo, sia per l'ingombro dei sensori, sia per il tipo di alimentazione.

Royer et al. (2021) nell'articolo "Performance assessment of radiation-based field sensors for monitoring the water equivalent of snow cover (SWE)" descrivono quattro sensori di nuova generazione, non invasivi e basati su diverse radiazioni che interagiscono con la neve per il monitoraggio della SWE: la sonda a raggi cosmici di neutroni (CRNS), lo scintillatore per il monitoraggio dei raggi gamma (GMON), il radar a onde continue modulato in frequenza (FMCW) a 24 GHz e i ricevitori del sistema globale di navigazione satellitare (GNSS, GNSSr). Tutte e quattro le tecniche hanno requi-

siti di potenza relativamente hanno requi scono misure SWE continue e autonome e possono essere facilmente installate in aree remote su stazioni automatiche alimentate anche a celle solari con batterie in tampone.

Nella Fig. 1, ridisegnata sempre da Royer et al. 2021, sono indicati i diagrammi dei percorsi di radiazione per i quattro approcci di misurazione dello SWE. In tutte le figure, le frecce nere corrispondono ai segnali naturali (a, b, c) o emessi (d, e), mentre le frecce rosse tratteggiate corrispondono ai raggi che interagiscono con la neve (più basso è il segnale che raggiunge il sensore, più alta è la SWE). L'impronta del sensore è definita dall'area da cui proviene la radiazione misurata che ha interagito con la neve.

(a) sonda a raggi cosmici di neutroni (CRNP) sotto la neve e interrata. In questo caso, le frecce nere rappresentano neutroni ambientali generati principalmente dalle interazioni dei neutroni secondari dei raggi cosmici con i nuclei terrestri e atmosferici. Le frecce rosse tratteggiate raffigurano neutroni che interagiscono con la neve, che diminuiscono quando aumenta la SWE. Le frecce blu tratteggiate rappresentano neutroni che interagiscono con l'umidità del suolo;

(b) CRNP sopra la neve, orientata verso il basso: funziona come in (a) per il significato delle frecce, ma le frecce blu tratteggiate raffigurano neutroni che interagiscono con l'umidità del suolo e dell'atmosfera;

(c) sensore di monitoraggio dei raggi gamma (GMON): come in (a) per il significato delle frecce;

(d) radar a onde continue modulate in frequenza (radar FMCW) orientata verso il

Figura 1. Da Royer et al. (2021). Tecniche diverse di misura dello SWE (spiegazione nel testo).



basso sopra la neve. Le frecce nere rappresentano l'onda emessa dal radar a 24 GHz; (e) ricevitori del sistema globale di navigazione satellitare (GNSS). Le due antenne ricevono i segnali emessi da tutti i satelliti GNSS presenti nel campo visivo delle antenne e a tutti gli angoli di incidenza: è mostrato solo un raggio incidente (freccia nera) a un angolo. In base all'algoritmo di inversione, vengono utilizzati diversi raggi che interagiscono con la neve (frecce rosse tratteggiate).

La rete di sensori CNRS di ARPA Veneto è formata da 25 sensori CRNS costituiti da un box a terra che contiene il rivelatore di neutroni, con la sua elettronica di lettura, e da un box fuori della neve installato sul palo dei pannelli solari, contenente un rivelatore di riferimento per monitorare il flusso di raggi cosmici in arrivo (Stevanato et al.2022) e quindi ottenere una miglior misura.

Questa tipologia di sensori fornisce delle misure di SWE areale (termine tecnico footprint) e non valori strettamente puntali. Tuttavia i valori di footprint dei CRNS sono ancora oggetto di dibattito nella comunità scientifica. Le simulazioni eseguite dai Weimar J. O. nel 2022 mostrano che, per un sensore CRNS al di sopra della neve, il raggio del footprint è compreso tra 130 e 140 m per valori di SWE > 200 mm, e maggiore per SWE < 200 mm. Jitnikovitch et al. (2021), hanno affermato che il footprint CRNS interrato dovrebbe essere piuttosto puntuale. Schattan et al. (2017) affermano di non aver misurato la saturazione per un manto nevoso dell'ordine di 600 mm w.e., su un footprint di 230 m di raggio dal box di misura a terra.

Le misure della rete del Veneto hanno evidenziato un valore di footprint variabile da pochi metri a un centinaio, ma ancora in via interpretazione (Fig. 2).

Una ulteriore valutazione dello SWE con lo stesso sensore viene espressa, in via sperimentale, mediante il conteggio dei muoni, con risultati molto incoraggianti (Gazzola et al., 2025). Muone è una particella subatomica instabile della stessa classe dell'elettrone - un leptone -, ma con una massa circa 200 volte superiore. I muoni costitui-



Station	Alt. [m]	Lat.	Long.	I.E.
1- Monti Alti Ornella	2227	46.475°	11.886°	No
2- Monte Cherz	2010	46.515°	11.878°	Container
3- Col dei Baldi	1913	46.415°	12.073°	Bosco
4- Cima Pradazzo	2187	46.355°	11.822°	Pista sci
5- Pale San Martino		46.279°	11.886°	No
6- Malga Losch	1757	46.262°	11.959°	No
7- Passo Falzarego	2090	46.520°	12.028°	Edifici
8- Ra Vales	2592	46.548°	12.076°	Dirupo
9- Monte Piana	2262	46.613°	12.250°	No
10- Tre Cime		46.617°	12.317°	no
11- C. Coltrondo	1929	46.665°	12.443°	Bosco
12- Casera Doana	1887	46.481°	12.541°	No
13- Monte Rite		46.541°	12.246°	Edifici
14- Val Salatis		46.143°	12.484°	Dirupo
15- Casera Palantina	1492	46.119°	12.475°	No
16- Faverghera	1607	46.074°	12.301°	No
17- Monte Lisser	1422	45.954°	11.650°	No
18- Malga Larici	1606	45.964°	11.418°	Bosco
19- Cima Dodici		45.978°	11.486°	No
20- Campomolon	1732	45.877°	11.250°	Bosco
21- P. Campogrosso	1462	45.728°	11.170°	Strada
22- Monte Baldo	1756	45.772°	10.865°	No
23- Val Visdende	2010	46.653°	12.617°	No
24- Sant'Antonio	1490	46.571°	12.485°	Bosco
25- Vette Feltrine	1900	46.098°	11.840°	No

Figura 2. Esempio di footprint del sensore (area con il cerchio azzurro).

Tab. I. Nella colonna a destra, per le stazioni non in campo libero, il tipo di infrastruttura vicina con possibile condizionamento delle misure. NEVE



Figura 3. Mappa con le stazioni con sensori CRNS.

Figura 4. Tecnica di campionamento B&C. Un tubo carotatore unico viene inserito nel manto nevoso (nel caso di nevi profonde ai diversi livelli) e la carota poi peseta. Conoscendo il volume del prelevato e l'altezza della neve al suolo, viene determianto lo SWE e la densità della neve.



scono gran parte della radiazione cosmica che raggiunge la superficie terrestre.

LA RETE DI ARPA VENETO

La rete di ARPA Veneto è stata realizzata nell'ambito del D.L. n. 59/2021, convertito con modificazioni dalla L. n. 101/2021, recante "Misure urgenti relative al Fondo complementare al Piano nazionale di ripresa e resilienza e altre misure urgenti per gli investimenti" nello specifico l'investimento "Salute, Ambiente, Biodiversità e Clima", incluso nel Piano Nazionale per Investimenti Complementari di competenza del Ministero della Salute. Le risorse economiche per realizzare la rete di CRNS e di altre tecnologie sono state trovate all'interno della Missione 6 – Salute del Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza "Rafforzamento complessivo delle strutture e dei servizi di SNPS-SNPA a livello nazionale, regionale e locale, migliorando le infrastrutture, le capacità umane e tecnologiche e la ricerca applicata", per il periodo 2021-2026.

La rete è stata realizzata con sensori CRNS collegati alle esistenti stazioni nivometeorologiche della rete regionale gestita da ARPA Veneto (Tab. I).

I sensori, interrati a livello di campagna o appoggiati e fissati su roccia per un piccolo numero di stazioni, sono interfacciati con le stazioni esistenti, trasmettendo i dati rilevati nello stesso flusso della stazione automatica (via radio o GRS) e alimentati con la stessa energia delle stazioni. I sensori hanno anche un flusso diretto di dati via rete 4G/5G per il controllo da remoto della funzionalità da parte del realizzatore dello strumento.

Nella stagione invernale 2023-24 sono diventati operativi i primi 20 sensori, mentre nella stagione 2024-2025 sono entrati in servizio tutti e 25 (Fig. 3).

DEFINIZIONE DI UNO SWE DI RIFERIMENTO SITO SPECIFICO

La definizione di un valore di SWE per un sito specifico è un'operazione assai complessa che dipende da molti fattori, principalmente meteorologici e morfologici. Il terreno ideale sarebbe un'area del tipo campo da calcio, con un drenaggio uniforme, in una zona senza vento, con profilo orografico circostante basso e con il sensore ubicato nella lunetta di centro campo. La realtà è ben diversa e le stazioni nivometeorologiche sono spesso ubicate in radure, altre volte in spazi aperti senza vegetazione, su suoli lisci o anche ondulati, inclinati, e che determinano una variabilità del manto nevoso al suolo in temini di spessore, ben identificate nei lavori sulla stabilità del manto nevoso (ad esempio Birkeland, 1997).

Pertanto la definizione di un valore di SWE in un sito specifico di riferimento può essere eseguita mediante campionamenti diretti in sito, ripetuti nel tempo e nello stesso punto (1-2 metri di distanza). Questa tipologia di campionamenti è sempre di carattere distruttivo, quindi non è ripetibile nello stesso identico punto, poiché la neve ne risulterebbe alterata e non rappresentativa.

l campionamenti diretti più comuni eseguiti sulle Alpi sono:

- di tipo verticale (B&G) con la metodologia descritta da Berni & Giancanelli (1966) (B&G), con prelievo e peso di una carota totale della neve al suolo (Fig. 4);
- di tipo orizzontale, strato per strato, utilizzando i profili del manto nevoso eseguiti dai Servizi valanghe (Yeti) e validati con la metodologia descritta da Valt et al. 2013.

Misure comparate delle due metodologie

hanno evidenziato errori inferiori al 5%, rientranti nella variabilità della ripetizione delle misure stesse (Valt, 2017) e quindi possono essere adottate per lo stesso sito specifico, con una prevalenza alle misure B&G (carotaggio verticale). Nei grafici sono riportate con la dicitura MISURE.

Oltre a questa tipologia di misure. che richiede la presenza in sito di operatori specializzati, è possibile definire un valore di SWE del sito specifico anche con:

- modello di simulazione del manto nevoso Snowpack (Lehning et al. 2001) (SnowP) che fornisce valori orari di SWE;
- modello statistico derivante dal valore di altezza neve della stazione (HS) giornaliero, moltiplicato per il valore statistico di densità della neve per y-esimo giorno della stagione invernale, su base storica (1991-2020) o della stagione in corso (SWE Rif).

Per quanto riguarda i risultati forniti dal modello del manto nevoso Snowpack, questi sono stati equiparati ai carotaggi verticali con valori del +/- 8% dello SWE totale e quindi ritenuti validi (Valt, 2017). I valori di Snowpack hanno il vantaggio di tener conto delle variazioni stagionali dello SWE, di eventuali episodi di pioggia su neve che non modificano il valore di HS ma determinano un aumento di densità. Tuttavia la qualità dei dati della stazione è importante per il calcolo dei flussi energetici del manto nevoso; talvolta gli errori riscontrati anche per le simulazione dello SWE sono stati dovuti ad imprecisioni strumentali non intercettate dalle routine di validazione dei dati dei sensori (Fig. 5). Inoltre, i valori delle simulazioni SnowP sono stati correlati con le misure e i campionamenti utilizzati nel presente lavoro con una risposta di un R2> 0.95.

Il modello statistico (SWE Rif) costituisce un'alternativa semplice e utilizzabile su tutte le stazioni in cui si dispone di un valore di altezza neve giornaliera. Il valore di densità è dato dal valore di riferimento per l'area (Valt M., 2025) per y-esimo giorno dal 1 di novembre, o caratteristico della stagione invernale. Nel caso di valori di riferimento, è importante che siano tarati





per tipologia di andamento della stagione invernale; i valori in primavera possono variare anche del 25-30%. Una stagione caratterizzata da spessori superiori al metro di neve al suolo già a fine novembre, avrà valori di densità elevati in primavera (400-450 kgm⁻³), rispetto ad una stagione invernale con poca neve (30-50 cm) e con nevicate da febbraio in poi (300-400 kgm⁻³). Le rette caratteristiche delle stagione invernale utilizzate nel presente lavoro sono state:

Per le Dolomiti

$$\label{eq:rho} \begin{split} \rho &= dy^*1,\!0842 + 199,\!19; periodo 1991-2020 \\ \rho &= dy^*0,\!9386 + 218,\!92; inverno 2023-2024 \\ \rho &= dy^*1,\!3107 + 151,\!30; inverno 2024-2025 \end{split}$$

Per le Prealpi

$$\begin{split} \rho &= dy^{*}1,\!1411 + 201,\!72; \, \text{periodo 1991-2020} \\ \rho &= dy^{*}1,\!1411 + 201,\!72; \, \text{inverno 2023-2024} \\ \rho &= dy^{*}1,\!4395 + 173,\!96; \, \text{inverno 2024-2025} \end{split}$$

dove ρ è la densità del manto nevoso in kgm⁻³ e dy è il numero progressivo di giorni dal 1 di novembre al 30 di maggio. Questi due metodi, SWE Rif e SnowP, permettono una verifica del dato del sensore CRNS anche dove non è possibile effettuare campionamenti diretti.

RISULTATI Stagione 2023-2024

Nel corso della stagione invernale 2023-2024 sono state realizzate un centinaio di misure di SWE specifico presso i campi neve.

Per alcune siti il campionamento è stato costante durante tutto l'inverno mentre per altri è stato saltuario a causa delle difficoltà di accesso.

L'iniziale analisi dei dati a fine stagione ha evidenziato delle sottostime importanti del CRNS per alcune stazioni in quota e quindi si è provveduto a ricalibrare la curva Figura 5. Esempio di curva cumulate dei valori di SWE per la stazione di Monti Alti di Ornella. Alla fine del mese di marzo e inizio di aprile, pur con una riduzione dello spessore della neve, lo SWE è leggermente aumentato per gli apporti di pioggia e per l'assestamento della neve senza perdita di massa.

Figura 6 . Le curve rappresentano due diverse parametrizzazioni della formula di conversione per arrivare con il CRNS a definire lo SWE: la curva nera è quella di più diffuso uso in letteratura antecedente, mentre la verde è la curva ottimizzata tramite interpolazione su un set campionamenti prevalentemente della montagna veneta.





Figura 7. Andamento invernale dello SWE nella stazione di Col dei Baldi-Dolomiti.

Figura 8. Andamento invernale dello nella stazione di Monte Lisser-Prealpi. caratteristica del sensore (Fig. 6) e a ricalcolare tutti i valori di SWE per la stagione invernale 2023-2024.

Nelle Fig. 6 e 7 relative alle stazioni di Col dei Baldi nelle Dolomiti e di Monte Lisser nelle Prealpi, sono rappresentati di tutti i valori misurati durante la stagione invernale.

In entrambi i casi è possibile osservare anche visivamente una buona correlazione fra tutte le misure effettuate.

Stagione 2024-2025

Nella stagione 2024-2025 sono stati effettuate, alla data del 25 aprile, oltre 100 misure di B&G e YETI presso i campi neve dove sono installati i sensori CRNS, con le stesse modalità della stagione invernale precedente. La curva di calibrazione dello strumento non è stata rettificata rispetto all'inverno precedente.

l risultati di correlazione sono stati nuovamente soddisfacenti.

Correlazione fra misure

In totale, nelle 2 stagioni invernali sono state utilizzate oltre 200 misure presso 8 stazioni meteo, con un valore finale di R2=0.91 (Fig. 9) con i dati misurati dal CRNS.

E' stata quindi elaborata anche la correlazione fra CRNS e SnowP e CRNS e Snow Rif con un R2=0.91 (Fig. 10) e R2=0.86. In particolare nella stagione 2023-24, con 19 sensori operativi, ben 11 hanno evidenziato un R2 > 0.90 e solo 3 un R2 < 0.80. Nella stagione 2024-25, con 25 sensori installati, 3 hanno evidenziato delle problematiche di trasferimento dei dati riconducibili a siti di nuova installazione, con effettivi problemi di invio dei dati via 4G/5G. Degli altri 22, 12 hanno registrato un R2 > 0.91 e ben 7 un R2 < 0.80.

Per 4 stazioni anche il confronto SWE CRNS e SWE Stat ha riportato un valore inferiore allo 0.80 ad indicare un'indipendenza dai fattori meteorologi (Snowpack considera anche la pioggia). Per alcune stazioni c'è stato un decadimento del valore di R2 fra le 2 stagioni invernali. Sono in corso di analisi le serie di dati per comprendere se sdi tratta di un problema di taratura di inizio stagione (umidità del suolo), di suolo (dolomia, calcare, argilla etc.) oppure di climatologia locale o stagionale (esempio pioggia su neve), che richiedono una curva di calibrazione diversa.

Ad esempio, il sensore di Passo Falzarego ha una evidente sottostima dello SWE (Fig. 11) ma il sito è condizionato da 2 edifici nelle vicinanze (10 metri).

In alcuni casi, come Casera Coltrondo, posta in mezzo ad una radura, tutte e 2 le stagioni hanno presentato un R2 inferiore a 0.80. E' probabile che non sia stato corretta la taratura iniziale del sensore in funzione della tipologia di suolo.

DISCUSSIONE

Il problema principale di ogni analisi dello SWE puntuale o areale, è definire il valore più rappresentativo a cui poi far riferimento. La metodologia B&G è consolidata da oltre 60 anni di misure e spazializzazione dei dati, ma non è esente da imprecisioni. Infatti, le misure di B&G, pur esprimendo il valore medio di 3 carotaggi verticali, come anche le misure di Yeti, sono prove distruttive del manto nevoso e quindi la ripetibilità nel tempo è in funzione del campo neve disponibile.

Anche le elaborazioni di Snowpack sono bidimensionali e si riferiscono al sito dove sono ubicati i sensori della stazione automatica nel tempo.

Le misure del CNRS, sono invece areali, anche se l'ampiezza del footprint non è ancora ben definita (Fig. 2). La presenza, nel raggio di 20-40m, di zone boscate, edificate, di bruschi cambiamenti di pendenza, può rendere la misura diversa dal singolo valore, come già evidenziato da alcune stazioni della rete regionale veneta. Infatti l'analisi dei dati ha evidenziato una sottostima dei valori per alcune stazioni, che si ritiene dovuta all'ubicazione del sensore rispetto all'ambiente circostante (vicinanza ad abitazioni, alberi, etc..).

La situazione ideale, anche per un'analisi del footprint in funzione dello spessore

del manto nevoso (HS) - poiché secondo alcuni autori dipende da esso - potrebbe essere quella della stazione di Monti Alti di Ornella (Fig. 2).

Nella Fig.12 è descritta la situazione della stazione di Cima Pradazzo, importante per il vento in quota e per il trasporto della neve. La zona del nivometro è senza neve (HS=0) e anche Snowpack stima SWE=0 mm. La sonda CNRS, "sente" correttamente la neve attorno indicando un valore di SWE. Inoltre la stazione è anche vicina alle piste di sci con innevamento programmato. Il sensore in questo caso è sensibile e misura anche gli apporti di neve programmata e quindi fornisce valori in aumento dello SWE non giustificati dal tempo meteorologico (precipitazioni o erosioni eoliche). In guesto caso le misure di confronto non sono attendibili ed è necessario effettuare delle misure di volume della neve adiacente per stimare il valore del CRNS.

Una ulteriore problematica ancora in fase di analisi è la sensibilità del sensore all'umidità del terreno ad inizio inverno, che fornisce falsi valori di SWE di 10-30 mm, che poi vengono integrati nel manto nevoso stagionale senza portare scompensi positivi nei valori misurati. Per questo sembra essere necessario un periodo predefinito di azzeramento di tutti i sensori in campo. Tuttavia la neve in quota nelle Dolomiti compare ad inizio ottobre mentre nelle Prealpi può arrivare anche a metà dicembre e quindi l'azzeramento deve seguire delle regole dettate dalla climatologia locale e dall'altimetria delle stazioni.

La taratura ad inizio stagione invernale è ancora in fase di discussione e analisi. Negli inverni con molto SWE è meno influente che negli inverni con SWE scarso, ovvero quando la stima più precisa è maggiormente richiesta per la scarsità della risorsa da stimare.

PROBLEMATICHE DI GESTIONE OPERATIVE DEI SENSORI CRNS

La prima stagione invernale è stata utilizzata per testare i sensori ed il loro funzionamento generale. Le misure sono servite





per migliorare la calibrazione del sensore. Dal punto di vista infrastrutturale, trovandosi i box interrati anche in zone dove la presenza di acqua di fusione è importante, sono state riscontrate delle anomalie nelle guarnizioni dei pressa-cavi con infiltrazioni d'acqua non desiderate.

Nelle stazioni più strumentate (18-20 sensori), alimentate a celle solari dove la batteria in tampone da 120mA era datata e tendente ad essere esausta, sono stati notati dei cali di tensione nei lunghi periodi di brutto tempo (5-10 giorni) dovuti al maggior consumo. Per mantenere operativa la stazione nivometeo, è stato temporaneamente spento il CRNS fino a quando la tensione è ritornata su valori normali; in un caso è stato sostituito un pannello solare con uno più efficiente e a maggior superficie. In qualche caso il sensore ha richiesto dei reboot da remoto. In generale la mancanza di valori nella banca dati è dovuta ad mancata trasmissione da zone molto remote per le nuove stazioni per le quali si deve ancora tarare la miglior trasmissione dati.

I sensori sono stati posizionati in modo casuale rispetto alle infrastrutture della stazione stessa e dei corpi solidi o arborei presenti nelle vicinanze. L'analisi dei dati della prima stagione invernale ha fornito indicazioni su come migliorare la misura posizionando in modo differente il sensore a terra. Figura 9. Confronto fra i valori CRNS e le misure a terra.

Figura 10. Confronto fra i valori CRNS e i valori di Snowpack.

NEVE

Per le stazioni con R2 inferiore a 0.80 sarà da valutare la localizzazione del sensore, l'elettronica o fattori che richiedono una propria taratura.

Non è stata ancora messa punto una metodologia per la taratura dei sensori ad inizio stagione: le misure hanno evidenziato che deve essere attuata per sito specifico in funzione anche della litologia del terreno. E' stato notato anche un eccesso di di spike fra i dati trasmessi dal sensore al data-logger della stazione meteorologica rispetto al flusso di dati al Cloud del fornitore dei sensori. E' probabile che ciò sia dovuto a delle interferenze nei cavi analogici.

sensore CRNS. Figura 12. Stazione di Cima Pradazzo, q. 2200 m. La stazione è senza neve sotto i sensori. Il CNRS sente la neve che è nel raggio di 20

m fornendo valori di SWE.

l'evidedente sottostima del

Figura 11. Valori di SWE

stagionale per il sito di

Passo Falzareao con

CONCLUSIONI

L'ARPA Veneto ha realizzato una rete di 25 sistemi CRNS per misurare la SWE, dislocati nella Dolomiti e Prealpi venete, ad altitudini che vanno dai 1300 ai 2600 m. Le stazioni hanno raccolto dati nelle stagioni invernali 2023-2024 e 2024-2025, registrando cumuli stagionali di SWE anche superiori ai 600 mm.

La tecnologia CRNS presenta diversi vantaggi rispetto ai metodi tradizionali, poiché consiste in una misurazione diretta e continua. Rispetto al carotaggio, che è una tecnica invasiva e distruttiva, la tecnicaa CRNS lascia inalterato lo stato del manto nevoso. A differenza del modello Snowpack, questa tecnica non si basa sulla stima precisa di altri parametri (come la temperatura, la profondità della neve e così via). Inoltre, non essendo una misura puntuale, può essere più rappresentativa di un sito specifico.



Le sonde CRNS hanno potuto essere facilmente integrate in stazioni meteorologiche e nivologiche d'alta quota preesistenti. Il basso consumo energetico dell'elettronica ha consentito il funzionamento integrato anche per le stazioni alimentate a celle solari con batterie tampone. La compattezza del sensore ha facilitato la corretta installazione anche su terreni rocciosi.

Le misure di SWE sono state convalidate dal confronto con le misure di carotaggio diretto (metodi YETI e Berni e Giancarelli), con i risultati del modello di simulazione del manto nevoso Snowpack, con valori statistici di riferimento e per diverse quantità di copertura nevosa, ottenendo valori di correlazione superiori a 0.90 per la maggior parte dei siti.

Poiché il manto nevoso è distribuito in modo diverso da sito a sito, a seconda dell'orografia del terreno, dell'esposizione e della presenza di alberi, si possono osservare differenze tra i metodi sopra citati. La valutazione dell'impatto della morfologia del sito e della presenza di elementi naturali/antropici all'interno del footprint della sonda CRNS è in corso di valutazione. Infine l'ottimo accordo tra i dati dimostra che la tecnologia CRNS può essere utilizzata con successo per la stima della neve su larga scala.



BIBLIOGRAFIA

- Bartelt, P., Lehning, M.,(2002). A physical SNOWPACK model for the Swiss avalanche warning: Part I: numerical model Cold Regions Science and Technology 35(3):123-145 35(3): 123-145 DOI:10.1016/ S0165-232X(02)00074-5
- Berni, A., Giancanelli, E., (1967). La campagna di rilievi nivometrici effettuata dall'ENEL nel periodo febbraio – giugno 1966. L'energia elettrica, 9, 542-553
- Birkeland, K.W., (1997). Spatial and temporal variations in snow stability and snowpack conditions throughout the Bridger Mountains, Montana. PhD dissertation, Department of Geography, Arizona State University, Tempe, AZ, 205 pp
- Bozzoli, M., Crespi, A., Matiu, M., Majone, B., Giovannini, L., Zardi, D., Brugnara, Y., Bozzo, A., Berro, D. C., Mercalli, L., & Bertoldi, G. (2024). Long-term snowfall trends and variability in the Alps. International Journal of Climatology, 44(13), 4571–4591. https://doi.org/10.1002/ joc.8597
- Cester, D., Lunardon, M., Moretto, S., Nebbia, G., Pino, F., Sajo-Bohus, L., Stevanato, L., Bonesso, I. and Turato, F. (2016). A novel detector assembly for detecting thermal neutrons, fast neutrons and gamma rays, Nucl. Instrum. Methods 830: 191–196. https://doi.org/10.1016/j. nima.2016.05.079,
- Colombo, N., Guyennon, N., Valt, M., Salerno, F., Godone, D., Cianfarra, P., Freppaz, M., Maugeri, M., Manara, V., Acquaotta, F., Petrangeli, A.B., Romano, R., (2023). Unprecedented snow-drought conditions in the Italian Alps during the early 2020s, Environ. Res. Lett. 18 074014 DOI 10.1088/1748-9326/acdb88
- Gianessi, S., Polo, M., Stevanato, L., Lunardon, M., Francke, T., Oswald, S.E., Ahmed, H.S., Toloza, A., Weltin, G., Dercon, G., Fulajtar, E., Heng, L. and Baroni, G., (2024). Testing a novel sensor design to jointly measure cosmic-ray neutrons, muons and gamma rays for non-invasive soil moisture estimation, Geosci. Instrum. Method. Data Syst. 13: 9–25. https://doi.org/10.5194/gi-13-9-2024, .
- Gottardi, F., Carrier, P., Paquet, E. and Laval M.-T., (2013). Le NRC: une décennie de mesures de l'équivalent en eau du manteau neigeux dans les massifs montagneux français, International Snow Science Workshop 2013, 33, 926–930,
- Kodama, M., Nakai, K., Kawasaki, S. and Wada, M., (1979). An application of cosmic-ray neutron measurements to the determination of the snow-water equivalent, J. Hydrol., 41, 85–92, https://doi.org/10.1016/0022-1694(79)90107-0, 1979.
- Jitnikovitch, A. and Marsh, P. and Walker, B. and Desilets, D., (2021). Snow water equivalent measurement in the Arctic based on cosmic ray neutron attenuation, The Cryosphere, 15, 5227-5239. DOI 10.5194/ tc-15-5227-2021,.
- Morin, M., Horton, S., Techel, F., Bavay, M., Coléou, C., Fierz, F., Gobiet, A., Hagenmuller, P., Lafaysse, M., Ližar, M., Mitterer, C., Monti, F., Müller, K., Olefs, M., Snook, J.S., van Herwijnen, A., Vionnet, V., (2020). Application of physical snowpack models in support of operational avalan-

che hazard forecasting: A status report on current implementations and prospects for the future, Cold Regions Science and Technology, Volume 170, 2020, 102910, ISSN 0165-232X, https://doi.org/10.1016/j. coldregions.2019.102910.

- Nitu, R., Roulet, Y.-A., Wolff, M., Earle, M., Reverdin, A., Smith, C., Kochendorfer, J., Morin, S., Rasmussen, R., Wong, K., Alastrué, J., Arnold, L., Baker, B., Buisán, S., Collado J.L., Colli, M., Collins, B., Gaydos, A., Hannula, H.-R., Hoover, J., Joe, P., Kontu, A., Laine, T., Lanza, L., Lanzinger, E., Lee, G.W., Lejeune, Y., Leppänen, L., Mekis, E., Panel, J.-M., Poikonen, A., Ryu, S., Sabatini, F., Theriault, J., Yang, D., Genthon, C., van den Heuvel, F., Hirasawa, N., Konishi, H., Motoyoshi, H., Nakai, S., Nishimura, K., Senese, A. and Yamashita, K., (2018). WMO Solid Precipitation Intercomparison Experiment (SPICE) (2012 – 2015). Instruments and Observing Methods Report No. 131. WMO, Geneve. https://library. wmo.int/idurl/4/56317, 2018
- Oveisgharan, S., Zinke, R., Hoppinen, Z., and Marshall, H. P., (2024). Snow water equivalent retrieval over Idaho – Part 1: Using Sentinel-1 repeat-pass interferometry, The Cryosphere, 18, 559–574, https://doi. org/10.5194/tc-18-559-2024,
- Royer, A., Roy, A., Jutras, S., and Langlois, A. (2021). Review article: Performance assessment of radiation-based field sensors for monitoring the water equivalent of snow cover (SWE), The Cryosphere, 15, 5079–5098, https://doi.org/10.5194/tc-15-5079-2021
- Stevanato, L., Baroni, G., Cohen, Y., Fontana, C.L., Gatto, S., Lunardon, M., Marinello, F., Moretto, S. and Morselli, L.. (2019). A Novel Cosmic-Ray Neutron Sensor for Soil Moisture Estimation over Large Areas, Agriculture 9: 202. https://doi.org/10.3390/agriculture9090202,
- Stevanato, L., Baroni, G., Oswald, S.E., Lunardon, M., Mares, V., Marinello, F., Moretto, S., Polo, M., Sartori, P., Schattan, P. and Ruehm, W., (2022). An Alternative Incoming Correction for Cosmic-Ray Neutron Sensing Observations Using Local Muon Measurement, Geophys. Res. Lett. 49: e2021GL095383. https://doi.org/10.1029/2021GL095383, 2022
- Valt, M. and Cianfarra, P. (2014). Snow water equivalent monitoring from MODIS data: the case study of the upper Piave river basin (eastern Italian Alps). Neve e Valanghe 83, 28-35, DOI: 10.13140/ RG.2.1.1183.8565.
- Valt, M., (2018). Variabilità spaziale della densità del manto nevoso e dello SWE. IV Interconfronto Snow Water Equivalent: metodi, tecniche e strumenti di misura in ambiente alpino Val di Susa – 19/20 marzo 2018- Atti
- Valt, M., (2023). La risorsa nevosa sulla montagna veneta (SWE). Report SNPA n.36/2023–ISBN 978-88-448-1168-6, Delibera del Consiglio SNPA. 14.07.2023 Doc. n. 213/23 https://www.snpambiente.it/2023/07/20/il-clima-in-italia-nel-2022/
- Weimar, J.O., (2022). Advances in Cosmic-Ray Neutron Sensing by Monte Carlo Simulations and neutron detector development, PhD thesis, Heidelberg University, https://www.physi.uni-heidlberg.de/ Publications/DissertationJannisWeimar.pdf